

サイドジェットの発生条件

A criterion for side-jet formation

○岩倉徹¹, 高橋真璃子¹, 金田康宏², 村松旦典³*Toru Iwakura¹, Mariko Takahashi¹, Yasuhiro Kaneda², Akinori Muramatsu³

When the mass density of the jet gas is sufficiently lower than that of the ambient gas, radial ejections of the jet gas may be generated near the nozzle exit. These radial ejections are referred to as *side jets*. The envelopment process of jets depends on the velocity profile at the nozzle outlet, which is generally evaluated by momentum thickness of shear layer in the jets. A domain for side-jet formation was experimentally investigated. The domain consists of density ratio of the jet gas and the ambient gas and non-dimensional momentum thickness.

1. はじめに

周囲気体より低密度の気体を噴出した噴流を対象とした Monkewitz ら^[1]による線形安定解析によると、噴出気体と周囲気体の密度比 S とマッハ数 M により噴流の安定性は変わり、 $S \leq 0.72$, $M \leq 0.67$ で絶対不安定となるとしている。このような条件の円形噴流では、噴流のコア領域で自励振動が生じ、コアの外側への噴流流体の噴出現象が生じる。この現象はサイドジェットと呼ばれている^{[2][4]}。Monkewitz ら^[2]はサイドジェットの形成条件として $S < 0.7$ で、噴出レイノルズ数あまり大きくないこととした。一方、Kyle ら^[3]は $S < 0.6$ で、ノズル出口での速度分布の形状が関係することを示した。Muramatsu ら^[4]は噴出レイノルズ数に下限があることを示している。噴流の遷移過程では、ノズル出口での噴流のせん断層の K-H 不安定 (変曲点不安定) が関係することから、本研究ではノズル出口直径 D_0 と運動量厚さ θ_0 の比と密度比 S をパラメータにして、サイドジェットの形成条件を調べている^[5]。

2. 実験装置及び方法

実験に使用した噴出気体を表 1 に示す。表 1 には噴出気体の密度 ρ_0 と周囲気体 (空気) の密度 ρ_∞ で定義される密度比 $S = \rho_0/\rho_\infty$ とヘリウムガスと空気の体積流量による混合割合を示している。噴流は、これらの気体を出口直径 $D_0 = 8$ mm で面積縮流比 $CR = 9.8$ と 68.1 の 2 種類の円形ノズルから、それぞれ静止空気中へ鉛直上方に噴出して形成した。熱線風速計と熱線濃度計を併用して、ノズル出口での速度分布を測定し、測定した速度分布から次式で定義される運動量厚さ θ_0 を算出した^[5]。

$$\theta_0 = \int_{\delta} \frac{U_0}{U_{c0}} \left(1 - \frac{U_0}{U_{c0}} \right) d\delta$$

Table 1. Density ratios of issuing gases.

S	GAS
0.14	He
0.4	Air:30% He:70%
0.6	Air:54% He:46%
0.65	Air:62% He:38%
0.7	Air:66% He:34%
0.75	Air:72% He:28%
0.8	Air:77% He:23%
1	Air

ここで、 U_0 , U_{c0} , δ はそれぞれノズル出口での噴流の速度、中心軸上の速度、せん断層の厚さである。

サイドジェット形成の有無は噴流をレーザーシートにより可視化して確認した。

3. 実験結果

図 1 にヘリウムガス噴流と空気噴流の θ_0 の測定結果を示す。CR によってノズル出口での速度分布の勾配が変わるため θ_0 の値は変わるが、 S によっては変化しないことがわかる。ノズル内の流れは層流境界層を形成していると考えられるので、 θ_0 は $1/(Re)^{0.5}$ に比例するとし、

$$\begin{aligned} \theta_0/D_0 &= 1.09 (1/(Re)^{0.5}) \quad (CR=9.8 \text{ の場合}) \\ &= 0.837 (1/(Re)^{0.5}) \quad (CR=68.1 \text{ の場合}) \end{aligned}$$

と近似できる。

すなわち、 θ_0/D_0 は速度分布の勾配と Re を含んだパラメータとなる。図 2 に噴流を可視化した写真を示す。サイドジェットは噴流が乱流遷移する前のコア領域から噴流半径方向外側への流体现象として判断している^[6]、図 2 の (a) の写真がサイドジェットを形成した場合、(c) 写真が形成しない場合とした。(b) のような噴流は形成の有無を判断できないとした。

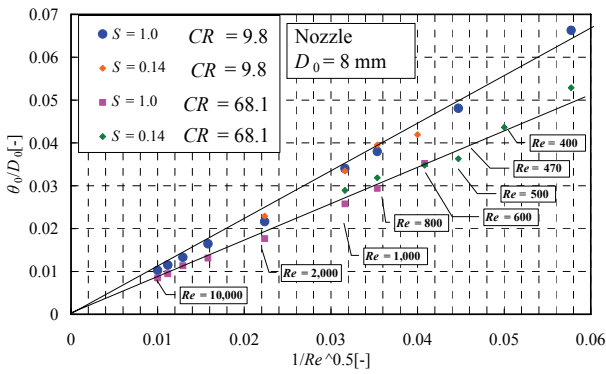


Figure 1. Momentum thickness for air and helium gas jets.

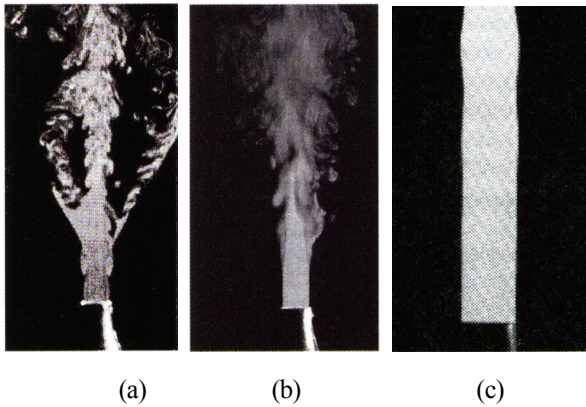


Figure 2. Visualization of mixture jets,

- (a) Obvious side-jet: ● $S = 0.17$ $Re = 800$ $CR = 9.8$,
- (b) Undecided: ▲ $S = 0.8$ $Re = 4000$ $CR = 9.8$,
- (c) No side-jet: ◆ $S = 0.14$ $Re = 600$ $CR = 68.1$.

図 2 の(a), (b), (c)のような噴流に対してそれぞれ記号を●, ▲, ◆として, S と D_0/θ_0 について整理すると図 3 になる. 図中の直線でサイドジェットが形成される領域とそれ以外の領域として明確に分けることができる. サイドジェットが形成される領域は $S \geq 0.0186 (D_0/\theta_0) - 0.337$, $S < 0.7$ で与えられる. しかし, D_0/θ_0 が大きくなると, すなわち, 速度勾配, または Re が大きくなってもサイドジェットが形成されない領域があることが分かった. 今後はMonkewitzら^[1]の研究を元に M に対する影響についても調べていきたい.

4. 参考文献

- [1] P. A. Monkewitz, and K. D. Sohn, AIAA J., Vol. 26, No. 8, pp. 911-916, (1988).
- [2] P. A. Monkewitz, D. W. Bechert, B. Barsikow and B. Lehmann, J. Fluid Mech., Vol. 213, pp. 611-639, (1990).
- [3] D. M. Kyle, D. M. Sreenivasan, K. R., J. Fluid Mech., vol. 249, pp. 619-664, (1993).
- [4] Muramatsu A., Gamba, M., and Clemens, T. N., Proceeding of 2nd international Conference on Jets, Wakes, and Separated Flows, (2008).
- [5] Kaneda Y, and Muramatsu A, Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, AJK 2011-21004, (2011).

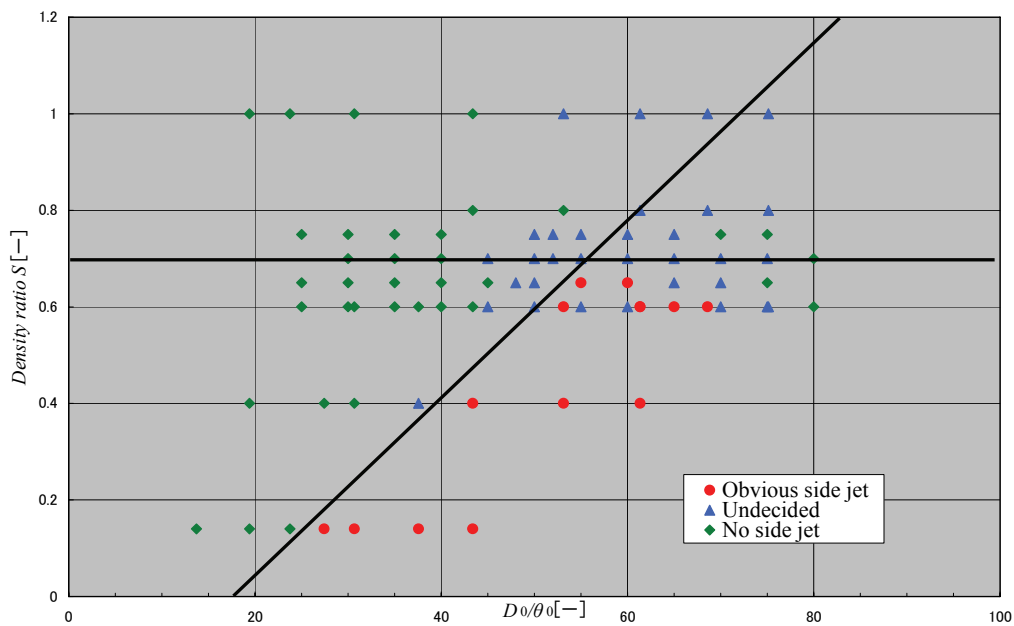


Figure3. Domain by momentum thickness ratio and density ratio for side-jet formation.